



# 对流层雷暴在近地空间的高能辐射效应——地球伽马射线闪

陆高鹏<sup>1,4\*</sup>, 熊少林<sup>2</sup>, 吕凡超<sup>3</sup>, 张鸿波<sup>4</sup>, 徐未<sup>5</sup>, 杨靖<sup>1</sup>, 祝宝友<sup>1</sup>, 刘非凡<sup>1</sup>, 李东帅<sup>6</sup>

1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026;
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
3. 南京气象科技创新研究院, 中国气象科学研究院, 南京 210000;
4. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
5. 科罗拉多大学博尔德分校航空工程科学系, 博尔德 CO 80303, 美国;
6. 西班牙国家研究委员会安达卢西亚天体物理研究所, 格拉纳达 18008, 西班牙

\*联系人, E-mail: [gaopenglu@gmail.com](mailto:gaopenglu@gmail.com)

收稿日期: 2020-08-06; 接受日期: 2020-09-30; 网络出版日期: 2020-11-12

国家重点研发计划(编号: 2017YFC1501501)、国家自然科学基金优秀青年科学基金(编号: 41622501)、国家自然科学基金(编号: 41875006)和国家自然科学基金卫星联合基金培育项目(编号: U1938115)资助

**摘要** 对流层中的活跃雷暴通过其内部的闪电活动实现不同空间、时间尺度和强度的电荷传输, 在雷暴上空的广阔空间中导致了多种形式的瞬态电磁效应。其中, 云内闪电可通过其初始阶段的上行负极性先导产生具有较高电离性的硬X射线和伽马射线脉冲, 形成地球伽马射线闪(Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGFs)。本文简要综述了过去十年来基于国外卫星平台的TGF研究进展, 主要包括: (1) TGF通常由云闪初始阶段的上行负先导产生, 且经常伴随峰值电流较大、脉冲电荷传输较强的云内放电过程(称之为云闪初始阶段的云内大脉冲过程); (2) 基于TGF宽带射频信号的特征, 可以发展出基于地面闪电信号测量的TGF遥感方法, 从而提高TGF及其母体雷暴的可研究样本量; (3) 关于TGF的产生机制, 目前尚没有统一观点, 存在热逃逸电子和相对论逃逸电子雪崩击穿两种主流理论, 这主要是因为目前还无法对TGF源区进行有效的观测。相对于中高层放电现象(如红色精灵、巨型喷流、蓝色射流等), 国内学者对于地球伽马射线闪的研究起步较晚, 相关的观测和机理研究落后于欧美研究团队。得益于近年来中国空间探测技术的创新发展, 尤其是“慧眼”硬X射线调制望远镜卫星(*Insight-HXMT*)和引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)等项目的实施, 在地基闪电探测技术持续发展的基础上, 中国的研究团队有望在地球伽马射线闪研究领域取得一系列重要进展。

**关键词** 硬X射线调制望远镜卫星(*Insight-HXMT*), 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM), 地球伽马射线闪(TGFs), 云闪初始阶段, 负极性上行先导

**PACS:** 52.80.Mg, 92.60.Pw, 92.60.hx, 87.50.Jk, 51.50.+v

**引用格式:** 陆高鹏, 熊少林, 吕凡超, 等. 对流层雷暴在近地空间的高能辐射效应——地球伽马射线闪. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129506  
Lu G P, Xiong S L, Lyu F C, et al. Terrestrial gamma-ray flashes as the high-energy effect of tropospheric thunderstorms in near-Earth space (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129506, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0303](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0303)

## 1 引言

作为地球对流层雷暴产生的大尺度放电现象, 闪电以其独特的方式影响着对流层同中高层大气之间的电磁耦合, 在中层大气和近地空间中引起了多种瞬态电磁效应, 如红色精灵(Red Sprite)、巨型喷流(Gigantic Jet)、地球伽马射线闪(Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGFs)等<sup>[1,2]</sup>, 可能对近地空间的飞行安全产生影响. 过去三十年中对这些现象的研究丰富了大气电学和闪电物理学的研究范畴, 使得闪电研究逐步扩展到空间科学的领域<sup>[3-5]</sup>. 20世纪末, 探测宇宙超新星爆发产生的伽马射线暴(Gamma-Ray Burst, GRB)的卫星平台探测到来自于地球表面的电离性高能射线<sup>[6]</sup>. 由于其较高的能谱范围(高达30 MeV甚至更高)<sup>[7-9]</sup>, 闪电活动产生的地球伽马射线闪对航空飞行器、近地航天器以及配载人员都有潜在的影响. 因此, 地球伽马射线闪是当前国际大气和空间电学中的前沿科学问题之一, 这方面的深入研究将为未来人类的近地空间活动安全提供重要保障.

地球伽马射线闪是指起源于地球低层大气的短暂( $\leq 1$  ms)而强烈(可高达几十MeV)的高能电离性射线(如硬X射线和伽马射线等)爆发<sup>[6-11]</sup>. 自1994年探测宇宙中伽马射线爆发的CGRO卫星首次发现了来自地球方向的伽马射线脉冲之后<sup>[6]</sup>, 国外多个星载探测器, 如美国的RHESSI和FERMI-GBM、意大利的AGILE以及欧洲航天局(ESA)的ASIM等卫星或空间载荷, 已陆续探测到了类似的高能辐射事件<sup>[7-9,12]</sup>. 作为当前雷电物理学研究中的热点方向之一, 国内外学者对TGF的研究表明至少相当一部分TGF事件与对流层中的闪电和雷暴活动有关<sup>[13-17]</sup>. 此外, 地面实验也观测到闪电所产生的高能辐射现象<sup>[18,19]</sup>, 并发现了更多同闪电相关的极端高能效应, 如闪电导致的光化核反应等<sup>[20]</sup>. 在早期的研究中, 学者提出TGF同早先发现的另外一种发生在雷暴上部广阔空间的奇特放电现象, 即中高层发光事件(Transient Luminous Events, TLEs)之一的红色精灵(Red Sprite)相关<sup>[6,21]</sup>. 随着越来越多的地基闪电射频信号被记录并用于分析, 发现TGF相关的闪电信号并不具有典型的红色精灵母体闪电信号特征<sup>[15,17]</sup>. 此外, 基于大量卫星探测数据的模拟分析将TGF的源区高度限定在15 km以下<sup>[22]</sup>. 目前一般认为, 具有强对流特征的雷暴云就像自然界中的粒子加速器. 对流层

中的雷暴活动通过对流驱动了正、负极性电荷的分离, 不同极性的电荷在不同的温度层结上占据了主导地位; 当云内两个主要电荷层之间的电场达到一定强度时, 导致介质击穿并形成向上发展的负极性先导过程, 而伽马射线脉冲正是在先导上行过程中产生的<sup>[16,23-25]</sup>.

然而, 关于TGF产生的物理机制, 目前尚没有统一观点, 并存在两种主要的理论模型, 即闪电先导局部区域中的热逃逸击穿(Thermal Runaway Breakdown)和大尺度雷暴电场中的相对论性逃逸电子雪崩(Relativistic Runaway Electron Avalanche, RREA)<sup>[26-29]</sup>. 这两种机制都可以形成逃逸电子同空气分子碰撞并产生韧致辐射(Bremsstrahlung Radiation). 前者认为先导发展过程中尖端局部区域电场远大于传统击穿阈值, 高能电子雪崩的空间特征长度很小(厘米量级), 该区域的电子能量部分中存在少量高能电子发生逃逸. 而后者则认为宇宙射线中的高能电子在进入雷暴云内强电场区时发生相对论电子逃逸击穿, 高能部分电子急剧增加, 其中可能还存在次级产物对雪崩倍增的正反馈效应<sup>[27]</sup>. 虽然两种理论都能很好地解释卫星观测数据, 但因为目前还无法对TGF源区进行有效的观测, 两者之间存在明显的区别: (1) 初始电子不同, 热逃逸理论中的初始电子是由闪电负向导头部的流光产生, 而相对论逃逸理论中的初始电子来源于宇宙射线和大气层的相互作用; (2) 加速电场不同, 热逃逸理论中的加速电场是由聚集在先导头部的大量负电荷产生的局域电场, 而相对论逃逸理论中的加速电场是大尺度的背景雷暴电场. 相比而言, 热逃逸击穿机制预测TGF的能谱主要取决于负先导头部的电场特性, 尤其是可被获取的电势能, 因此可以延伸至100 MeV以上的幂律谱<sup>[28,29]</sup>, 而相对论性逃逸电子雪崩机制则预测TGF的能谱是指数截断的幂律谱, 其截断特征能量大约为7 MeV<sup>[26,27]</sup>. 此外, Dwyer<sup>[27]</sup>通过模拟研究发现, 宇宙射线产生的高能电子数目远不足以解释卫星观测到的伽马通量, 于是进一步提出了基于X射线和正电子的相对论反馈理论(Relativistic Feedback Mechanism). 相对于传统的RREA理论, 近年来的研究发现相对论反馈理论与卫星观测数据更加一致<sup>[30]</sup>, 而这一理论中的加速电场也是闪电先导头部的局域电场.

为了更好地区分上述两种理论, 还需要更多更为全面的观测个例从多个角度来辨识TGF的母体闪电特

征, 尤其是高能辐射产生阶段闪电通道发展的精细过程. 比如, TGF事件相关的闪电信号一般都表明较大的脉冲电荷传输过程<sup>[31,32]</sup>, 而目前还不清楚该脉冲电荷传输的形成同高能辐射产生之间的物理联系如何. 虽然目前已有观测将TGF的源区高度限定在15 km以下, 但还无法准确限定TGF源区的高度, 尚无法在更高分辨率上解析TGF的产生过程. 因此, 为了更好地确定TGF的产生机制, 需要以更高的时空分辨率探测TGF源区的电学、光学和辐射特性.

## 2 国内外的TGF研究平台

国外目前已有多个卫星平台实现了TGF的探测. 最初的TGF观测主要基于CGRO搭载的BATSE平台, 由Gerald Fishman (2011年邵逸夫天文学奖获得者)于1990年在《科学》杂志(*Science*)上发表文章首次报道了TGF现象的空间探测, 并认为这种现象同对流层中的雷暴活动有关<sup>[6]</sup>. 此后, RHESSI多年的观测结果表明, TGF的全球分布特征同卫星平台观测的闪电活动分布特征具有较好的相似性<sup>[33]</sup>, 即TGF的发生率在低纬地区最高, 并随着纬度不断降低; 在经度上呈现出三个集中分布的区域(即非洲中部、南中国海地区和美洲加勒比海地区). 目前, 有关TGF的射频闪电信号分析主要围绕卫星在中纬度地区观测到的事件<sup>[13,15-17,24,25,34]</sup>. 低纬和高纬地区的雷暴(尤其是海洋性雷暴)产生的TGF目前仅有非常少的基于地面观测数据的研究<sup>[35]</sup>, 对于这些地区TGF母体闪电和雷暴的特征还需要进一步探索.

在RHESSI之后, 越来越多的空间探测平台被用于

观测来自地球对流层大气的瞬态高能辐射事件, 包括同TGF相关联的地球电子束(Terrestrial Electron Beam, TEB)<sup>[14,36,37]</sup>, 如美国NASA的FERMI-GBM和意大利航空局的AGILE<sup>[9-11,38]</sup>. 此外, ESA在国际空间站(International Space Station, ISS)上搭载了ASIM探测器来研究闪电在雷暴上空的平流层和中层大气中产生的高空放电现象(如红色精灵、光晕和蓝色射流等), 并监测对流层闪电活动产生的X射线和伽马射线闪<sup>[4]</sup>. 表1给出了上述卫星观测平台的有关技术参数, 包括轨道高度、倾角及观测的能量范围等. 通过对比可以看出, 中国研究团队的空间粒子探测技术尚处在起步阶段, 目前主要针对较低能量范围的粒子探测, 但在观测方式上有所创新和突破<sup>[39]</sup>.

“慧眼”-硬X射线调制望远镜(*Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, Insight-HXMT*)是中国第一个空间天文卫星<sup>[39]</sup>, 于2017年6月15日在酒泉卫星发射中心成功发射. *Insight-HXMT*的高能探测器在200 keV至几MeV能区可获得高质量的光变和能谱观测数据. 对初期获取数据的分析表明, *Insight-HXMT*卫星具有一定的TGF探测能力, 其覆盖范围可达到纬度45°区域. 在轨运行的FERMI-GBM卫星仅能探测到发生于我国南部地区、纬度低于26°N的TGF, 这些都为利用*Insight-HXMT*卫星在中国地区开展TGF研究提出了实际需求<sup>[32]</sup>.

引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)是中国研究团队自主研发的第二个能够探测TGF的卫星平台. GECAM由两颗微小卫星组成, 两颗卫星共轨运行在600 km高度、29°倾角

表 1 TGF观测报道文献中相关卫星平台的技术参数比较

Table 1 Comparison of technical parameters of the relevant satellite platforms in the literature of TGF observations

卫星名称	国家和地区	轨道高度 (km)	轨道倾角 (°)	观测能段	运行年限
CGRO-BATSE	美国	450	28.5	20 keV–2 MeV, 8 MeV	1991/4/5–2000/6/4
RHESSI	美国	490–505	38	3 keV–20 MeV	2002/2/5–2018/8/16
FERMI-GBM	美国	550	25	150 keV–30 MeV	2008/6/11至今
AGILE	意大利	509–533	2.5	–	2007/4/23至今
ISS-ASIM	欧洲	403–408	51.64	15 keV–400 keV, 200 keV–40 MeV	2018/4/22至今
<i>Insight-HXMT</i>	中国	550	43	8 keV–5 MeV	2017/6/15至今
GECAM(双星)	中国	600	29	8 keV–2 MeV	预计2020年底发射



的低轨圆形轨道上. 每颗卫星配置有25个伽马射线探测器(GRD)和8个荷电粒子探测器(CPD), 分别探测8 keV–2 MeV的伽马射线和300 keV–5 MeV的电子<sup>[40]</sup>. 凭借针对性的设计, GECAM卫星在探测TGF和TEB上具有明显优势. 首先, GRD采取了缩短死时间、增加探测器个数等优化措施, 尽量避免TGF高流强导致的脉冲堆积效应, 准确测量TGF的能谱和光变曲线; CPD可探测TEB, 采用逐事例探测器, 死时间短, 且采用多个CPD判定TEB的入射方向. 综合GRD和CPD等多个探测器的信息, 将联合测量TGF和TEB的辐射性质, 从而全面研究伽马射线和电子的产生机制, 这是其他卫星都不具备的能力. 其次, GECAM包括两颗卫星, 两颗卫星共轨运行使得其对地球上同一雷暴区域的重访时间显著缩短(~45 min), 有利于发现同一个雷暴区域产生的多个TGF和TEB, 并研究它们的发生规律. TGF和TEB是新兴的高能大气物理的主要研究对象, 是GECAM项目除了研究引力波伽马暴和太阳耀斑等高能天体源之外的重要科学目标之一.

此外, 中国的研究团队自2013年开始利用高灵敏度低频磁天线建立了覆盖中国及东南亚周边地区的闪电效应研究平台(Lightning Effects Research Platform, LERP)<sup>[41]</sup>, 为探测和量化研究TGF电磁信号, 进一步探究TGF母体闪电特征构建了良好基础. 未来的研究工作将利用*Insight*-HXMT卫星和GECAM卫星以及地基LERP平台观测, 结合闪电定位、风云气象卫星、天气雷达、气象探空资料等对地球伽马射线闪进行综合观测, 建立东亚地区的TGF综合观测数据集, 认识中国地区TGF的时空分布特征, 研究TGF与闪电、母体雷暴的关系.

### 3 TGF母体闪电及其雷暴的研究

#### 3.1 产生高能辐射的闪电物理过程

TGF最初认为可能同产生红色精灵的正地闪有关, 并有学者提出了相关的理论模型来解释高能射线的产生<sup>[21,42]</sup>. 自Stanley等人<sup>[15]</sup>以地基天电探测信号表明TGF母体闪电的信号更具有云内放电的特征以来, 越来越多的地基观测表明TGF同云闪初始阶段的上行先导放电过程有关<sup>[16,17,23–25]</sup>. 基于大量TGF闪电信号的统计分析也支持这一观点<sup>[31]</sup>. 图1给出了同2004–2011年期间RHESSI卫星探测到的135例TGF事件以及

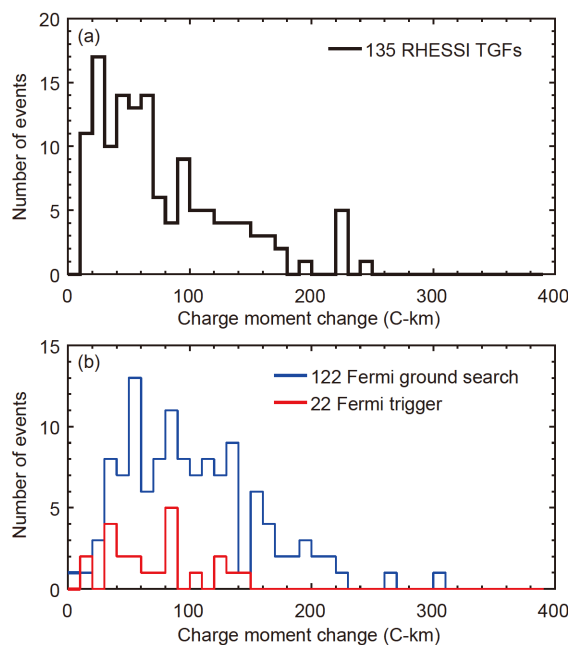


图1 同RHESSI和FERMI-GBM卫星探测到的TGF相关的脉冲电荷矩统计直方图. (a) 2004–2011年期间RHESSI探测到的135个TGF事件; (b) FERMI-GBM在2009–2011年期间探测到的144个TGF事件(其中122个通过地面辨识程序识别, 22个通过在地轨触发识别)

**Figure 1** Statistical histogram of impulse charge moment related to TGFs detected by the RHESSI and FERMI-GBM satellites. (a) 135 TGFs detected by RHESSI during 2004–2011; (b) 144 TGFs detected by FERMI-GBM during 2009–2011 (including 122 events identified by ground search procedure, and 22 events recognized by the on-orbit triggering algorithm).

2009–2011年期间FERMI-GBM探测到的144例TGF事件相关的脉冲电荷矩估算结果(根据杜克大学站点测得的宽频段磁场信号). 可见有相当一部分的TGF相关放电过程都产生了较大的脉冲电荷矩, 但是一般都小于产生红色精灵所需要的阈值(一般为+300 C km左右)<sup>[43]</sup>. 因此, 在有越来越多的个例分析从不同的视角证实TGF同云闪初始阶段上行负极性先导之间相关性的同时, 尚无确切的观测表明TGF同正极性地闪回击产生的红色精灵相关.

Lu等人<sup>[16]</sup>以美国北阿拉巴马闪电成像阵列(Lighting Mapping Array, LMA)观测网附近的一个被RHESSI卫星探测到的TGF事件为例, 从地基观测上确认了高能辐射脉冲同云闪初始阶段上行负先导过程的相关性. 如图2所示, 这次TGF事件同一些在较高高度(一般超过10 km)上探测到的云闪起始阶段甚高频辐射源相关. 距离700多公里处的超低频磁传感器记录

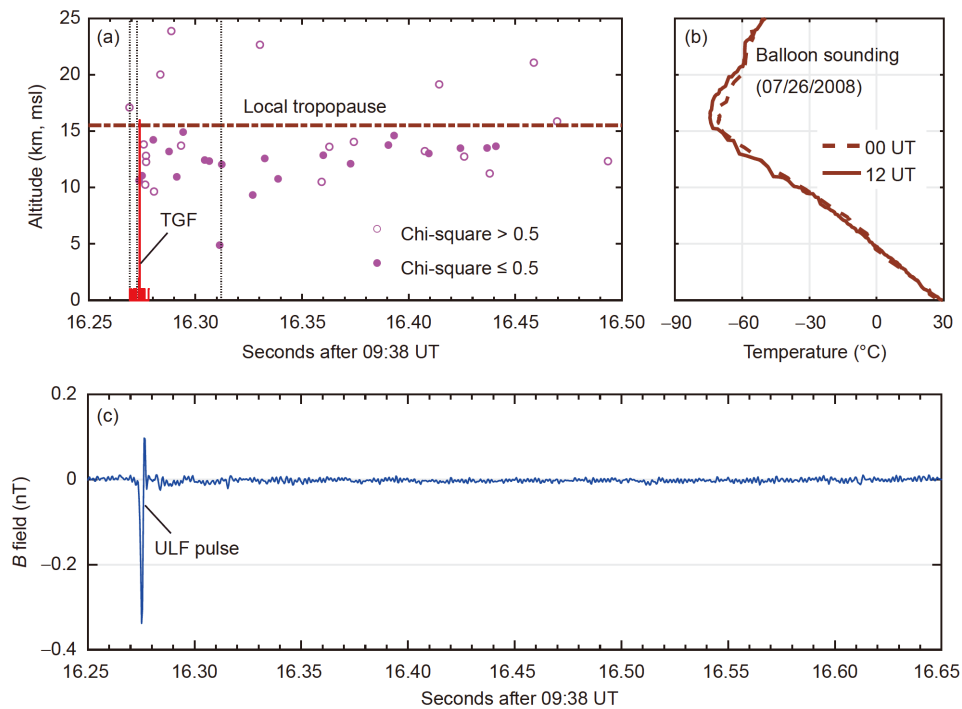


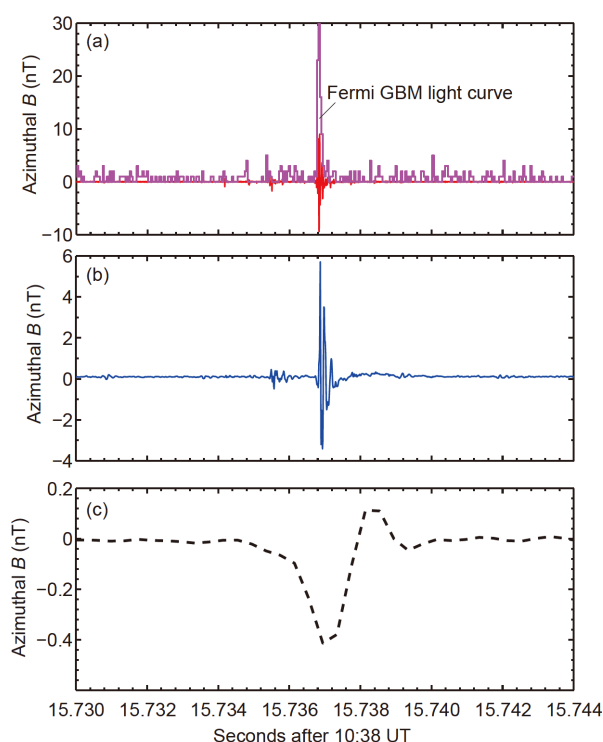
图 2 同2008年7月26日0938:16 UTC RHESSI探测到的TGF事件相关的LMA观测结果(a)以及同步的超低频(ULF)磁场数据(c), 表明这次TGF事件出现在云闪初始(负极性先导上行发展)阶段, 并伴有明显的超低频磁场脉冲(表明较为显著的电荷传输过程)<sup>[16]</sup>. 同探空曲线(b)的比较表明, LMA定位的辐射源主要同负极性先导在雷暴云正极性电荷区的传播有关

**Figure 2** LMA observation of a RHESSI-detected TGF (a) and the associated ultra-low frequency (ULF) magnetic field (c) at 0938:16 UTC on 26 July 2008. The TGF event appeared during the initial stage of intra-cloud lightning (corresponding to the progression of an upward negative leader), and the distinct ULF magnetic field pulse indicates a significant charge transfer process [16]. The comparison with temperature profile from the balloon sounding (b) indicates that LMA mainly detected the propagation of negative leader in the upper positive cloud region.

到峰值高达+0.36 nT的磁场脉冲, 说明在TGF发生时产生了显著的垂直方向电荷传输, 这对应于云闪初始阶段的上行负先导过程. 类似的较大垂直方向电荷传输一般认为由正极性地闪产生. 对同一次雷暴中的其他云内放电过程分析表明, 云闪初始阶段的较大脉冲电荷传输其实是普遍现象, 但是强度在个体之间的差别较大, 同该TGF相关的个例是脉冲电荷传输最强的两个个例之一(另外一个个例达到了+0.76 nT). Lyu等人<sup>[24]</sup>分析了LMA探测网同步观测到的三例TGF事件, 并对TGF相关的闪电事件的VHF辐射特征进行了重点研究. 结果再次表明, TGF产生于云内初始阶段的上行先导传播过程, 而且与TGF相关的放电过程产生了当次闪电中可探测到的最强的VHF辐射, 说明TGF的产生与云内闪电初始阶段活跃的上行负先导发展密切相关.

综上所述, TGF一般发生在云闪初始阶段的活跃的上行先导放电过程中, 并通常伴随着较强的低频/甚

低频以及VHF辐射. 图3所示为一例同TGF事件相关的典型多频段磁场测量结果(所有测量结果均已经考虑到传播延迟, 即回溯到WWLLN给出的经纬度位置, 并假设高度为12 km), 体现了如下三个特征<sup>[31]</sup>: (1) 超低频磁场传感器测量到的持续时间大约2 ms的磁场脉冲, 表明TGF相关放电过程伴随有较为显著的垂直方向电荷传输; (2) 甚低频磁场传感器测量到的振荡特征(反映了闪电电磁场信号在地球-电离层波导中的传播)较为明显的一个同TGF事件几乎同时发生的主要磁场脉冲; (3) 在TGF相关磁场脉冲之前出现的多个较弱磁场脉冲(反映了云闪始发到TGF发生之间的一系列云内弱放电过程). 这些典型的电磁辐射特征为开展TGF过程的地面观测提供了依据, 进而有助于通过更丰富的综合观测研究TGF的发生过程和产生机制. 类似的特征也被用于研究负极性云-地闪电中下行负极性先导可能导致的高能辐射现象<sup>[44]</sup>. 目前对于TGF源区的观测和模拟研究取得了以下一些共识: TGF产生于云



**图 3** 典型的TGF相关闪电射频信号(从上至下分别为低频(a)、甚低频(b)和超低频(c)磁场传感器获得的磁场天电信号波形). (a)为以 $40\ \mu\text{s}$ 作为时间窗口的TGF光变曲线. 该TGF事件由FERMI-GBM于2010年10月12日1038:15 UTC(世界时)探测到. 母体闪电被全球闪电定位网(WWLLN)探测到, 距离位于Duke Forest中的磁场测量站点大概1937 km

**Figure 3** Typical radio-frequency lightning signals associated with TGFs (from top to bottom, the signals are obtained with low frequency (a), very-low frequency (b), and ultra-low frequency (c) magnetic field sensors). Panel (a) also shows the light-curve of TGF with a time bin of  $40\ \mu\text{s}$ . The TGF event was detected by FERMI-GBM at 1038:15 UTC on 12 October 2010. The parent lightning was detected by the World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) at a distance about 1937 km from a measurement site located in Duke Forest.

间闪电的初始发展过程<sup>[16,17,23,25,26]</sup>, 源区高度在距离地面大约12 km<sup>[24,34,35]</sup>, 大于1 MeV的伽马射线数目多于 $10^{18}$ 个<sup>[18]</sup>, 以及源区的电子加速过程能产生微弱的337 nm蓝光等<sup>[45]</sup>.

### 3.2 TGF地基空基平台协同观测的展望

在深入了解TGF产生过程物理机制的同时, 其不同地区的母体雷暴特征对于相关研究的实际应用具有重要意义. 同卫星气象数据的对比分析表明, TGF一般由对流较强的雷暴云体产生<sup>[46,47]</sup>, 且平均而言, TGF出现在雷暴闪电活动达到峰值后半小时左右<sup>[33]</sup>. 对于热带气旋等大尺度的气象系统而言, TGF多产生于闪

电活动较为活跃的外雨带<sup>[48]</sup>. 什么样的雷暴能产生TGF, 或者说雷暴在什么样的阶段容易产生TGF, 都是未来研究工作中需要关注的问题. 因为目前的TGF探测主要基于空间平台, 其探测结果的分布范围极为广泛, 而地面综合观测的范围通常又较为局限, 因此较难获得TGF事件的高质量地面综合观测结果. 利用地面综合观测, 包括三维闪电成像、多普勒雷达反射率探测和近距离闪电电磁场测量等, 研究具有TGF闪电普遍特征的云内放电过程是一个可行的手段.

图4给出了结合超低频(ULF)磁场数据和北阿拉巴马LMA甚高频闪电成像数据识别出的一次可能产生TGF的云内闪电(发生时间为2010年6月10日0013:35 UTC). 同图4(a)中闪电初始阶段一次明显的ULF脉冲过程相对应, 美国国家闪电探测网(National Lightning Detection Network, NLDN)探测到一次峰值电流为+25kA的云内放电过程. 越来越多的观测表明至少一部分TGF同云闪初始阶段的云内大脉冲过程(Energetic Intra-Cloud Pulse, EIP)密切相关<sup>[16,24]</sup>. EIP是一类发生在云内放电初始先导过程中并产生强电磁辐射过程的放电事件, 且EIP通常伴随TGF发生<sup>[49-51]</sup>. 对此类强电磁辐射过程的观测研究将有助于解析TGF的发生过程以及产生机制. 类似的方法已被应用于研究TGF相关闪电的地面电场特征<sup>[52]</sup>. 此外, 云内闪电初始阶段的超低频磁脉冲表明TGF的产生过程伴随有较大的脉冲电荷矩, 形成较大的地面静电场变化, 可在近距离进行测量, 实现TGF相关电荷传输过程的物理描述. 目前对于同TGF密切相关的电荷传输, 还不清楚其放电过程影响电荷区的空间范围有多大. 值得注意的是, 图4中的个例在闪电后期也有一个幅值较大的超低频磁场脉冲(出现在图中35.9 s左右), 根据甚高频定位结果, 其应该对应了一次云内K过程(有学者也称之为云内回击过程).

为了进一步解析TGF的产生机制, 并从物理层面上了解TGF同母体闪电和雷暴之间的相关性, 仍然需要在综合雷电观测条件良好的地区针对TGF源区闪电通道开展高时空分辨率的多参量观测. TGF事件的低频闪电电磁信号则显示了母体闪电发展过程中的脉冲信号, 可用于对TGF相关闪电过程在雷暴云内的空间发展进行三维成像. 目前国际上发展较快的低频闪电三维成像技术为获得近距离闪电动态发展特征提供了很好的方法<sup>[50]</sup>. 近年来, 国内在闪电探测技术方面取得的进展(如短基线甚高频闪电成像和闪电的高速光学成

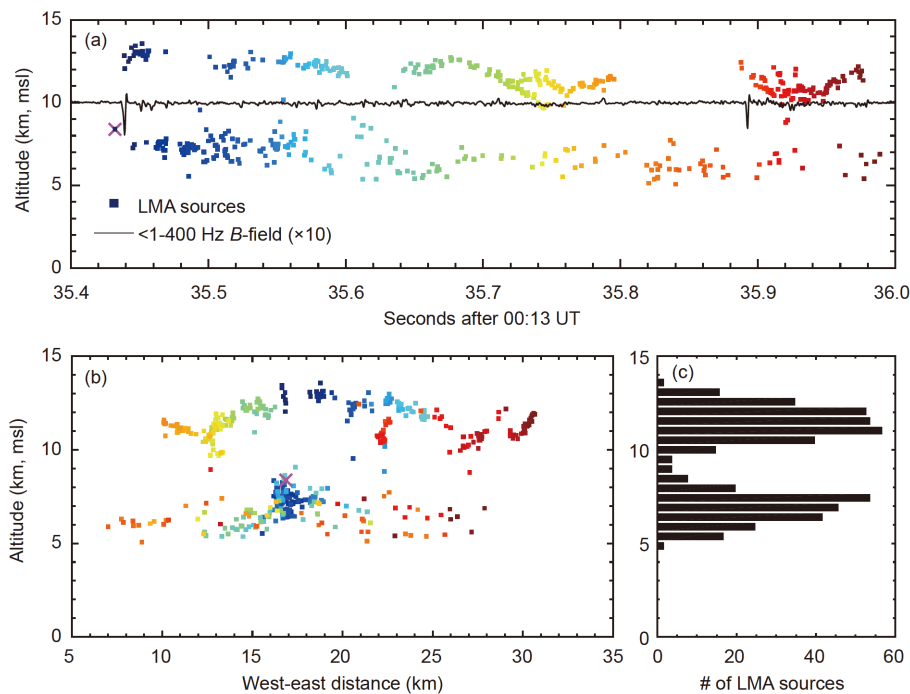


图 4 2010年6月10日位于美国北阿拉巴马州甚高频(VHF)闪电成像阵列(LMA)观测到的一次可能产生TGF的云闪事件(云闪初始阶段上行负先导期间出现的较大幅值超低频磁场脉冲是TGF相关闪电信号的典型特征). (a) 高度随时间的变化; (b) 向北方向的垂直投影图; (c) VHF辐射源的高度分布直方图

**Figure 4** One potential TGF-producing intra-cloud lightning flash observed on June 10, 2010 by the LMA in northern Alabama. The large ultra-low frequency (ULF) magnetic field pulse occurring during the initial stage of intra-cloud lightning with an upward negative leader is a typical feature of TGF-related lightning signals. (a) Altitude vs. time; (b) view to north; (c) altitude histogram of VHF radiation source.

像等)为研究具有TGF普遍信号特征的云内闪电提供了条件. 因此, 开展地面组网观测, 将闪电成像网络(如LMA等)观测同地面静电场测量结果相结合, 并采用电荷源拟合的方法可确定TGF母体闪电电荷传输的源区位置. 闪电成像系统与地面静电场的协同观测将以更高的时间和空间分辨率揭示TGF事件相关闪电过程的电荷传输, 从而揭示闪电高能辐射的产生机理. 此外, 在未来的研究中还可以利用人工引雷野外观测实验基地的已有观测设备(如快/慢天线、短基线甚高频闪电成像系统、高速摄像和低频磁天线闪电成像阵列等)开展具有TGF母体闪电普遍特征的深入分析, 相关研究内容具有重要的科学意义和实际应用价值, 将使中国团队在闪电高能辐射方面的研究达到国际前沿水平.

由于卫星观测资料的缺乏, 国内学者对于闪电和雷暴的高能辐射现象研究较少<sup>[53,54]</sup>, 仅有一些工作利用国外卫星数据研究TGF的能谱分布特征<sup>[3]</sup>. 通过分析RHESSI卫星自2002年以来在亚洲东部地区观测到的TGF事件发现, 在中国东部和南部有比较明显的

TGF分布. 可惜的是, 由于在中国大陆地区缺少宽频电磁测量站点, 目前还未能对TGF相关的闪电波形进行系统的分析, 因此无法确定该地区TGF相关闪电的电学属性. Lu等人<sup>[32]</sup>利用台湾成功大学的同步测量数据, 对比了RHESSI卫星在东亚和北美地区探测到的TGF相关闪电宽频段磁场信号, 发现两个地区的TGF闪电具有相似的射频信号特征和发展过程. 目前, 中国的研究团队已在中国地区架设了多个低频(3–300 kHz)磁场记录站点, 并在赤道地区马六甲架设了海外测站<sup>[35,55]</sup>, 目前架设的站点可用于定位强度较大的闪电, 且闪电波形可保存用作量化研究的数据集<sup>[41]</sup>. 在一些夜间光学观测条件较好的区域, 还架设了低光度瞬态光学事件记录设备, 观测该地区的中高层放电现象<sup>[56,57]</sup>.

## 4 总结和展望

作为对流性雷暴云内闪电始发后数毫秒内发生的



瞬态高能辐射现象, TGF及其相关联的TEB是目前国际上大气和空间电学研究中的前沿探索方向之一<sup>[1,2,12]</sup>. 它们产生于雷暴和闪电过程, 跟雷电始发机制和地表、大气以及近地空间辐射环境都有密切关系. 对这些现象的研究可为探索闪电在雷暴云内的始发机制提供重要的信息, 同时也将推动对流层闪电活动对临近空间影响的研究. 基于国外多个卫星探测平台的一系列研究已经识别出产生TGF和TEB的主要闪电过程(即云闪初始阶段的上行负极性先导), 并识别出该过程的宽频段(从几百赫兹到几十兆赫兹)信号特征. 其中最为显著的是其伴随发生的云闪大脉冲过程, 具有较高的峰值电流和脉冲电荷矩. 尽管目前TGF的探测在很大程度上依赖于空间探测平台, 后继的地基雷电综合观测可以围绕云闪初始阶段的云内大脉冲过程展开, 利用多种探测手段协同观测的方式了解这一过程的精细发展过程. 相关研究工作将为甄别当前两种解释TGF产生机制的主流理论(即热逃逸电子雪崩和相对论逃逸电子雪崩击穿)提供重要的观测依据.

在已有低频磁天线网络的基础上, 针对TGF综合观测所需的时空分辨率可在研究区域中增设多套低频磁天线系统, 并在地面雷电测量设备比较齐全的山东沾化和广东从化人工引雷野外观测基地开展针对具有TGF母体闪电普遍特征的云内闪电的综合观测. 还将同中国科学技术大学的雷电研究团队合作, 利用华东地区江淮闪电定位网(Jianghuai Area Sferic Array, JASA)的电场探测数据对Insight-HXMT和GECAM的探测结果进行分析<sup>[58]</sup>. 此外, 利用低频闪电定位网获取的雷电磁场信号, 整合FERMI-GBM卫星探测结果建立东亚地区TGF的宽频闪电信号数据集, 用于研究多种平台探测的TGF同母体闪电之间的时空相关性. 同时, 利用武汉大学在随州布设的甚低频磁场站点数

据<sup>[59]</sup>辨识东亚地区TGF的脉冲电荷传输过程. 通过与北美地区的结果进行比较, 达到研究不同地区TGF相关闪电电学属性和母体雷暴对流过程特征的目的. 近期, 基于LERP位于赤道地区马六甲的站点, 已经获得了一些重要数据集为ASIM项目观测到的窄双极脉冲过程(另一类同雷暴深对流密切相关的云内放电过程<sup>[58]</sup>)提供地面数据支持<sup>[60]</sup>. 值得注意的是, 中国有多个具有地区特色的雷暴区域, 如江淮地区的梅雨天气系统, 华南的前汛期(即每年4–6月份的雨季), 青藏高原的局地小尺度突发性雷暴, 更是研究较少. 因此, 在中国大陆地区开展的TGF研究具有较明显的地域特色, 将大大丰富大气电学的研究内容.

在一些重大研究计划(如“雷暴云起放电过程的立体协同精细化观测”和“海上强对流过程中闪电演变特征与机理研究”等重点研发专项的相关课题)的支持下, 中国的研究团队近年来在国内雷暴活动较活跃地区连续开展夏季的综合雷电观测, 并将一些雷电探测设备逐步部署到南中国海地区的测量平台上来获取相关科学数据. 结合目前可以获取的一些空间探测数据(如FERMI-GBM和ASIM等)来看, 获取一批高质量的TGF综合观测数据, 将有利于推动闪电高能物理这一研究领域的发展.

Insight-HXMT和GECAM两个空间天文卫星项目为中国研究团队利用自主研发的探测器开展对流层雷暴和闪电活动对近地轨道空间的高能辐射影响提供了良机, 配合已建成的长基线闪电定位网, 在中国华东、华南及南中国海地区开展观测, 将获得星载TGF观测的高质量综合数据. 得益于两个卫星平台较高的飞行倾角和中国大陆较低的向南延伸纬度, 中国研究团队协同建立的空基-地基联合观测平台将为TGF现象的研究工作开辟更为广阔的前景.

**致谢** 本文分析所使用的TGF卫星观测数据由FERMI-GBM团队(<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/gbm/daily/>)和RHESSI团队(<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/>)提供, 对此表示感谢.

## 参考文献

- 1 Qie X S, Wang J F. Research progress of phenomenology and physical mechanism of terrestrial gamma-ray flashes (TGFs) (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 893–906 [鄒秀书, 王俊芳. 地球 $\gamma$ 射线闪(TGFs)及其物理机制研究进展. *地球科学进展*, 2010, 25: 893–906]
- 2 Zhang Y J, Zhang Y. The effect research of ionosphere in response to lightning discharge during thunderstorm (in Chinese). *J Appl Meteorol*



- Sci, 2016, 27: 570–576 [张义军, 张阳. 雷暴闪电放电活动对电离层影响的研究进展. 应用气象学报, 2016, 27: 570–576]
- 3 Feng H, Li T P, Wu M, et al. Temporal and spectral properties of gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1036, arXiv: astro-ph/0202100
- 4 Neubert T, Østgaard N, Reglero V, et al. The ASIM mission on the international space station. *Space Sci Rev*, 2019, 215: 26
- 5 Yu B, Xue X, Kuo C, et al. The intensification of metallic layered phenomena above thunderstorms through the modulation of atmospheric tides. *Sci Rep*, 2019, 9: 17907
- 6 Fishman G J, Bhat P N, Mallozzi R, et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science*, 1994, 264: 1313–1316
- 7 Briggs M S, Fishman G J, Connaughton V, et al. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi gamma-ray burst monitor. *J Geophys Res*, 2010, 115: 387–410
- 8 Smith D M, Lopez L I, Lin R P, et al. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. *Science*, 2005, 307: 1085–1088
- 9 Marisaldi M, Fuschino F, Labanti C, et al. Detection of terrestrial gamma ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E13
- 10 Briggs M S, Xiong S, Connaughton V, et al. Terrestrial gamma-ray flashes in the Fermi era: Improved observations and analysis methods. *J Geophys Res Space Phys*, 2013, 118: 3805–3830
- 11 Connaughton V, Briggs M S, Holzworth R H, et al. Associations between Fermi gamma-ray burst monitor terrestrial gamma ray flashes and sferics from the world wide lightning location network. *J Geophys Res*, 2010, 115: A12307
- 12 Neubert T, Østgaard N, Reglero V, et al. A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning. *Science*, 2020, 367: 183–186
- 13 Cummer S A, Zhai Y, Hu W, et al. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: 487–500
- 14 Sarria D, Kochkin P, Østgaard N, et al. The first terrestrial electron beam observed by the atmosphere-space interactions monitor. *J Geophys Res Space Phys*, 2019, 124: 10497–10511
- 15 Stanley M A, Shao X M, Smith D M, et al. A link between terrestrial gamma-ray flashes and intracloud lightning discharges. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L06803
- 16 Lu G, Blakeslee R J, Li J, et al. Lightning mapping observation of a terrestrial gamma-ray flash. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L11806
- 17 Shao X M, Hamlin T, Smith D M. A closer examination of terrestrial gamma-ray flash-related lightning processes. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E30
- 18 Dwyer J R, Schaal M M, Cramer E, et al. Observation of a gamma-ray flash at ground level in association with a cloud-to-ground lightning return stroke. *J Geophys Res*, 2012, 117: A10303
- 19 Hare B M, Uman M A, Dwyer J R, et al. Ground-level observation of a terrestrial gamma ray flash initiated by a triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 6511–6533
- 20 Enoto T, Wada Y, Furuta Y, et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*, 2017, 551: 481–484
- 21 Lehtinen N G, Bell T F, Inan U S. Monte Carlo simulation of runaway MeV electron breakdown with application to red sprites and terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 1999, 104: 24699–24712
- 22 Dwyer J R, Smith D M. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L22804
- 23 Østgaard N, Gjesteland T, Carlson B E, et al. Simultaneous observations of optical lightning and terrestrial gamma ray flash from space. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2423–2426
- 24 Lyu F, Cummer S A, Krehbiel P R, et al. Very High frequency radio emissions associated with the production of terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 2097–2105
- 25 Pu Y, Cummer S A, Lyu F, et al. Low frequency radio pulses produced by terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 6990–6997
- 26 Gurevich A V, Duncan L M, Karashtin A N, et al. Radio emission of lightning initiation. *Phys Lett A*, 2003, 312: 228–237
- 27 Dwyer J R. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes. *J Geophys Res*, 2008, 113: D10103
- 28 Xu W, Celestin S, Pasko V P. Source altitudes of terrestrial gamma-ray flashes produced by lightning leaders. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L08801
- 29 Celestin S, Xu W, Pasko V P. Terrestrial gamma ray flashes with energies up to 100 MeV produced by nonequilibrium acceleration of electrons in lightning. *J Geophys Res*, 2012, 117: A05315

- 30 Mailyan B G, Xu W, Celestin S, et al. Analysis of individual terrestrial gamma-ray flashes with lightning leader models and Fermi gamma-ray burst monitor data. *J Geophys Res Space Phys*, 2019, 124: 7170–7183
- 31 Lu G, Cummer S A, Li J, et al. Characteristics of broadband lightning emissions associated with terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 2011, 116: A03316
- 32 Lu G, Zhang H, Cummer S A, et al. A comparative study on the lightning sferics associated with terrestrial gamma-ray flashes observed in Americas and Asia. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 2019, 183: 67–75
- 33 Smith D M, Hazelton B J, Grefenstette B W, et al. Terrestrial gamma ray flashes correlated to storm phase and tropopause height. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E49
- 34 Cummer S A, Briggs M S, Dwyer J R, et al. The source altitude, electric current, and intrinsic brightness of terrestrial gamma ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2015, 41: 8586–8593
- 35 Zhang H, Lu G, Lyu F, et al. First measurements of low-frequency sferics associated with terrestrial gamma-ray flashes produced by equatorial thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e89005
- 36 Cohen M B, Inan U S, Said R K, et al. A lightning discharge producing a beam of relativistic electrons into space. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L18806
- 37 Xiong S, Briggs M S, Connaughton V, et al. Location prediction of electron TGFs. *J Geophys Res*, 2012, 117: A02309
- 38 Marisaldi M, Argan A, Ursi A, et al. Enhanced detection of terrestrial gamma-ray flashes by AGILE. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 9481–9487, arXiv: [1605.07886](https://arxiv.org/abs/1605.07886)
- 39 Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. Overview to the Hard X-ray Modulation Telescope (*Insight*-HXMT) Satellite. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 249502
- 40 Zhang D, Li X, Xiong S, et al. Energy response of GECAM gamma-ray detector based on LaBr<sub>3</sub>:Ce and SiPM array. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2019, 921: 8–13
- 41 Huang A, Lu G, Zhang H, et al. Locating parent lightning strokes of sprites observed over a mesoscale convective system in Shandong Province, China. *Adv Atmos Sci*, 2018, 35: 1396–1414
- 42 Inan U S, Reising S C, Fishman G J, et al. On the association of terrestrial gamma-ray bursts with lightning and implications for sprites. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 1017–1020
- 43 Lu G, Cummer S A, Li J, et al. Coordinated observations of sprites and in-cloud lightning flash structure. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 6607–6632
- 44 Lyu F, Cummer S A. Energetic radio emissions and possible terrestrial gamma-ray flashes associated with downward propagating negative leaders. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 10764–10771
- 45 Xu W, Celestin S, Pasko V P. Optical emissions associated with energetic electrons produced by stepping leaders in cloud-to-ground lightning discharges. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 5610–5616
- 46 Splitt M E, Lazarus S M, Barnes D, et al. Thunderstorm characteristics associated with RHESSI identified terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E38
- 47 Chronis T, Briggs M S, Priftis G, et al. Characteristics of thunderstorms that produce terrestrial gamma ray flashes. *Bull Am Meteorol Soc*, 2016, 97: 639–653
- 48 Roberts O J, Fitzpatrick G, Priftis G, et al. Terrestrial gamma ray flashes due to particle acceleration in tropical storm systems. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 3374–3395
- 49 Cummer S A, Lu G, Briggs M S, et al. The lightning-TGF relationship on microsecond timescales. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L14810
- 50 Lyu F, Cummer S A, Briggs M, et al. Ground detection of terrestrial gamma ray flashes from distant radio signals. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 8728–8734
- 51 Lyu F, Cummer S A, McTague L. Insights into high peak current in-cloud lightning events during thunderstorms. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 6836–6843
- 52 Marshall T, Stolzenburg M, Karunarathne S, et al. Initial breakdown pulses in intracloud lightning flashes and their relation to terrestrial gamma ray flashes. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 10907–10925
- 53 Li X Q, Jiang R B, Zhang X, et al. Lightning  $\gamma$ -ray burst observation based on sodium iodide detector (in Chinese). *Atomic Energy Sci Tech*, 2018, 52: 1092–1098 [李小强, 蒋如斌, 张雄, 等. 基于碘化钠探测器的闪电 $\gamma$ 射线爆发观测研究. *原子能科学技术*, 2018, 52: 1092–1098]

- 54 Wang J F, Qie X S, Lu H, et al. Effect of thunderstorm electric field on intensity of cosmic ray muons (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 159202 [王俊芳, 郗秀书, 卢红, 等. 雷暴电场对宇宙射线次级粒子 $\mu$ 子的影响研究. *物理学报*, 2012, 61: 159202]
- 55 Sabri M H M, Ahmad M R, Esa M R M, et al. Initial electric field changes of lightning flashes in tropical thunderstorms and its relationship to the lightning initiation mechanism. *Atmos Res*, 2019, 226: 138–151
- 56 Wang Y P, Lu G P, Ma M, et al. Analysis of parent thunderstorms of red sprites in northeast China (in Chinese). *Chin J Atmospheric Sci*, 2019, 43: 1055–1067 [王庸平, 陆高鹏, 马明, 等. 中国东北地区红色精灵的母体雷暴分析, *大气科学*, 2019, 43: 1055–1067]
- 57 Wang Y P, Lu G P, Ma M, et al. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China. *Earth Planet Phys*, 2019, 3: 111–125
- 58 Liu F, Zhu B, Lu G, et al. Observations of blue discharges associated with negative narrow bipolar events in active deep convection. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 2842–2851
- 59 Chen Y P, Ni B B, Gu X D, et al. First observations of low latitude whistlers using WHU ELF/VLF receiver system. *Sci China-Tech Sci*, 2017, 60: 166–174
- 60 Soler S, Pérez-Invernón F J, Gordillo-Vázquez F J, et al. Blue optical observations of narrow bipolar events by ASIM suggest corona streamer activity in thunderstorms. *J Geophys Res Atmos*, 2020, 125: e32708

## Terrestrial gamma-ray flashes as the high-energy effect of tropospheric thunderstorms in near-Earth space

LU GaoPeng<sup>1,4\*</sup>, XIONG ShaoLing<sup>2</sup>, LYU FanChao<sup>3</sup>, ZHANG HongBo<sup>4</sup>, XU Wei<sup>5</sup>,  
YANG Jing<sup>1</sup>, ZHU BaoYou<sup>1</sup>, LIU FeiFan<sup>1</sup> & LI DongShuai<sup>6</sup>

<sup>1</sup> School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

<sup>2</sup> Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup> Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Nanjing 210000, China;

<sup>4</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>5</sup> Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder CO 80303, USA;

<sup>6</sup> Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Granada 18008, Spain

Thunderstorms in the troposphere produce lightning flashes and cause charge transfer of different strength at varying spatial and temporal scales, leading to various forms of transient electromagnetic effects in the vast space above thunderstorms. In particular, normal intra-cloud (IC) lightning can generate ionizing hard X-rays and gamma rays, forming Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs). We briefly summarize the progress in TGF studies that has been achieved in the past decade based on multiple space-borne platforms: (1) TGFs are usually associated with the upward negative leader during the initial stage of IC flashes and are often accompanied by relatively strong IC discharge with high peak current and large charge transfer, which is called the energetic IC pulse (EIP); (2) based on the characteristics of TGF-related radio-frequency signals, we can develop a remote sensing approach with ground-based measurements of lightning signals, thereby greatly enriching the investigation dataset of TGFs and parent thunderstorms; (3) till date, no unified mechanism for TGF production has been developed due to a lack of effective observation with respect to the source region. Thermal runaway breakdown and relativistic runaway electron breakdown are the two mainstream theories to explain TGF production. Compared with transient luminous events (TLEs; e.g., red sprites, gigantic jets, and blue jets) as the lightning-induced dielectric breakdown in the mesosphere, studies on TGFs, in terms of both observations and theoretical interpretation, lag behind the research in Europe and the USA. However, along with China's latest progress in space detection technology (particularly the implementation of the *Insight* Hard X-ray Modulation Telescope (*Insight*-HXMT) and the Gravitational-wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM)), researchers in China desire to make steady progress in the field of TGF studies through continuous efforts in developing ground-based lightning detection techniques.

**Hard X-ray Modulation Telescope (*Insight*-HXMT), Gravitational-wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM), terrestrial gamma-ray flashes (TGFs), initial stage of intra-cloud lightning, negative upward leader**

PACS: 52.80.Mg, 92.60.Pw, 92.60.hx, 87.50.Jk, 51.50.+v

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0303](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0303)